

资源开发中碳中和技术路径选择与经济性分析

姚永仲¹ 徐兴卫^{1,2} 吕鹏²

1. 昆明冶金高等专科学校 云南 昆明 650033

2. 云南巧消渣科技有限公司 云南 昆明 650033

摘要: 据IPCC (AR6) 最新数据, 碳排放预期目标很难达成, 全球气候变化问题的日益严峻, 实现碳中和已成为国际社会的共同目标。资源开发作为经济社会发展的重要支撑, 其过程中的碳排放问题不容忽视。

关键词: 资源开发; 碳中和; 技术路径

引言

资源开发是人类社会发展的重要基石, 但传统资源开发方式往往伴随着大量的碳排放 (表1), 对环境造成严

重影响。因此, 探索资源开发中的碳中和技术路径, 实现资源开发与环境保护的双赢, 是当前亟待解决的问题。

表1 各类化石能源碳排放系数^[1]

指标	原煤	焦炭	原油	汽油	柴油	天然气
折标准煤系数 (tce/t)	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4571	1.3300
碳排放系数 (t/tce)	0.7559	0.8550	0.5857	0.1450	0.5921	0.6185

IPCC (AR6) 报告指出, 气候变化已经造成如陆地、淡水、沿海和远洋生态破坏和损伤, 物种灭绝速度加快等, 这些都相当严重地降低了生态系统服务能力, 及其对应气候变化的调节能力, 且不可逆。

据《全球碳排放与碳收支遥感评估科学报告》, 过去10年, 碳排放其实处于失控状态, 大气CO₂浓度年增6‰。过去40年, 全球范围森林砍伐加速度仍旧, 林地面积持续减少, 因土地利用变化产生年均32亿吨CO₂, 仅次于第一大碳源化石能源。我国得益于造林生态工程, 年固定CO₂近4亿吨。过去40年, 全球土壤每年吸收约13亿吨CO₂, 中国约占全球1/4。

能源利用面临转型。据《BP世界能源统计年鉴2024 (第73版)》, 较轻碳含量的天然气采用, 2023年全球以煤和石油为主的化石能源虽比例由2022年的81.9%降至81.5%, 但消费量仍为上升。2023年, 化石燃料排碳约占全球总排碳400亿吨的87% (基于一次能源统计), 我国排排CO₂126亿吨, 其中公路运输行业12.28亿吨, 占全国总量的9.8%。

1 资源开发中的碳排放现状

1.1 资源开发过程中的碳排放

实体的碳足迹有 (1) 燃烧、生产中的化学过程, 或逸出直接排放; (2) 耗电量所产生的间接排放 (不含购买行为); (3) 其他间接排放 (生产的产品、通勤、差旅等产生)。在资源开发的广阔领域中, 无论是矿产开采、能源生产, 还是土地利用, 都伴随着显著的碳排放

问题, 且排放量在逐年上升 (表1)。以矿产开采为例, 煤炭在开采过程中, 不仅消耗大量能源, 而且煤炭本身的燃烧更是二氧化碳排放的主要来源之一。同样, 石油和天然气的开采也不容忽视, 特别是在开采过程中产生的甲烷排放, 其温室效应远超二氧化碳, 对气候变化构成严峻挑战。此外, 土地利用变化, 如森林砍伐、土地退化、人类生活对碳排放也不可忽视。除了资源开发, 其它工业、农业和生活 (图1) 等众多社会因子, 直接或间接导致了碳汇减少和排放增加, 进一步加剧了温室气体的排放问题^[2]。

中国计划2023年实现碳达峰, 2060年实现碳中和, 美国提出不晚于2050年净零排放, 欧盟计划2050年实现欧洲“气候中性”。

1.2 碳排放对环境的影响

资源开发中的碳排放对环境造成了深远影响。它加剧了全球气候变化的趋势, 使得极端天气事件如暴雨、干旱、热浪频发, 冰川融化导致海平面升高使沿海城市面临淹没风险, 海洋生态受损珊瑚礁等敏感生态系统遭受破坏, 陆地生态受损导致生物多样性丧失, 终将导致对人类社会和生态系统造成严重损毁。

2 资源开发中碳中和技术路径选择

2.1 清洁能源替代

清洁能源一直是全球能源重点研究和改进方向。2020年全球化石能源占比高达83.1%, 其中煤炭、石油、天然气分别占27.2%、33.0%、24.7%。我国作为世

世界上最大的能源生产国和消费国，化石能源占比更是高达84.4%，其中煤炭占56.6%。因此，清洁能源替代成为了资源开发中实现碳中和的首要途径。风能作为一种清洁、可再生的能源，具有巨大的发展潜力。通过建设风电场，利用风力发电，可以有效减少对化石燃料的依赖，降低碳排放。同时，太阳能也是另一种极具潜力的清洁能源。太阳能光伏板可以将太阳光转化为电能，为家庭、企业和城市提供绿色电力。随着光伏技术的不断进步和成本的降低，太阳能发电将更加普及，成为替代化石能源的重要选择。水能作为一种传统且稳定的可再生能源，同样在清洁能源替代中发挥着重要作用。通过建设水电站，利用水流的动力发电，可以实现大规模、高效率的能源转换。此外，潮汐能、地热能等其他形式的可再生能源也在不断探索和发展中，为清洁能源替代提供了更多选择。对于我国而言，作为世界上最大的能源生产国和消费国，化石能源的高占比更是凸显了清洁能源替代的紧迫性。需要加快能源结构调整，提高清洁能源在能源消费中的比重。通过大力发展水能、风能、太阳能等可再生能源，可以逐步减少对煤炭、石油等化石能源的依赖，降低碳排放，推动能源产业的绿色转型^[3]。

2.2 碳捕集与封存技术 (CCUS)

碳捕集与封存技术 (CCUS) 作为一种有效的碳中和手段，正在受到越来越多的关注。该技术通过捕集工业排放中的二氧化碳，并将其封存于地下或海底，从而避免其排放到大气中，实现碳的永久封存。在资源开发过程中，尤其是化石能源开采和利用环节，CCUS技术具有广阔的应用前景。例如，在煤炭燃烧过程中，可以采用碳捕集技术将产生的二氧化碳捕集下来，然后通过管道或其他运输方式将其输送到封存地点进行永久封存。同样，在石油和天然气开采过程中，也可以利用CCUS技术处理产生的甲烷等温室气体，减少其对气候变化的贡献。CCUS技术的实施需要政府、企业和科研机构的共同努力。政府需要制定相关政策，鼓励企业采用CCUS技术，并提供资金和技术支持。企业需要加大研发投入，推动CCUS技术的创新和应用。科研机构则需要深入研究CCUS技术的机理和效果，为技术推广提供科学依据。值得注意的是，CCUS技术虽然具有显著的碳减排效果，但也面临着一些挑战和限制。例如，封存地点的选择和安全性问题、技术成本和经济可行性等都需要进一步研究和解决。因此，在推广CCUS技术时，需要综合考虑技术、经济、环境等多方面的因素，制定科学合理的实施方案。

2.3 节能减排技术

节能减排技术是实现资源开发中碳中和的关键所

在。通过优化资源开发流程、提高能源利用效率、采用低碳技术和设备等措施，可以显著降低资源开发过程中的碳排放。在资源开发流程优化方面，可以通过改进开采技术、提高资源回收率等措施来降低碳排放。例如，在煤炭开采过程中，采用先进的开采技术和设备，可以提高煤炭的回收率，减少资源的浪费和碳排放。同时，还可以对资源开发过程中的废弃物进行综合利用，实现资源的循环利用和碳的减排。提高能源利用效率是节能减排技术的另一重要方面。可以通过改进能源使用方式、采用高效节能设备等措施来降低能源消耗和碳排放。例如，在工业生产中，可以采用先进的生产工艺和设备，提高能源利用效率，减少能源的浪费和碳排放。同时，还可以推广智能电网、智能家居等智能能源管理系统，实现能源的精细化管理和节约。此外，采用低碳技术和设备也是节能减排技术的重要途径。例如，在交通运输领域，可以推广电动汽车、混合动力汽车等低碳交通工具，减少燃油消耗和碳排放。在建筑领域，可以采用节能建筑材料和节能技术，提高建筑的保温隔热性能和能源利用效率。为了实现节能减排技术的广泛应用和推广，需要加强政策引导和市场机制建设。

2.4 生态修复与碳汇建设

生态修复与碳汇建设是实现资源开发与环境保护协调发展的重要途径。通过植树造林、湿地恢复、土壤改良等措施，可以增加生态系统的碳汇能力，从而抵消资源开发过程中的碳排放。植树造林是生态修复与碳汇建设的重要措施之一。通过大规模植树造林，可以增加森林面积和森林蓄积量，提高森林的碳汇能力。同时，森林还可以提供氧气、净化空气、保持水土等生态服务功能，为人类社会带来多重效益。湿地恢复也是生态修复与碳汇建设的重要途径。湿地作为地球上最重要的生态系统之一，具有显著的碳汇功能。通过恢复湿地植被、改善湿地水质等措施，可以提高湿地的碳汇能力，为应对气候变化做出贡献。土壤改良同样在生态修复与碳汇建设中发挥着重要作用。通过采用科学的土壤改良技术和管理措施，可以提高土壤的肥力和碳储存能力，从而增加土壤的碳汇功能。

3 资源开发中碳中和和技术路径的经济性分析

资源开发中碳中和和技术路径的经济性分析是一个复杂而重要的课题。企业需要综合考虑初期投资与长期运营成本、经济效益与环境效益的平衡以及技术创新与产业升级的推动等因素。通过科学合理的决策和策略制定，企业可以在实现碳中和目标的同时，实现经济效益与环境效益的双赢，推动社会的可持续发展。

3.1 初期投资与长期运营成本

资源开发中碳中和技术的初期投资往往是一个显著的挑战。这些技术，无论是清洁能源替代、碳捕集与封存（CCUS），还是节能减排技术，都需要大量的资金投入用于技术研发、设备购置以及基础设施建设。以清洁能源替代为例，风能、太阳能等可再生能源项目的初期投资通常包括风电场、光伏电站的建设费用，以及相关的输电、配电设施等。这些投资往往数额巨大，且回收周期较长。然而，从长远来看，这些碳中和技术的运营成本却相对较低。以可再生能源为例，一旦风电场或光伏电站建成并投入运营，其运营成本主要集中在设备维护和电力传输上，相较于化石能源的开采、加工和运输成本，这些费用通常要低得多。此外，随着技术的不断进步和规模效应的显现，可再生能源的发电成本也在持续下降，使得其在经济上更具竞争力。

3.2 经济效益与环境效益的平衡

在资源开发中碳中和技术的选择过程中，企业需要综合考虑经济效益与环境效益之间的平衡。这既是一个经济问题，也是一个社会问题。从经济效益的角度来看，企业需要确保投资回报。这意味着在选择碳中和技术时，企业需要考虑技术的成本效益、市场需求以及政策环境等因素。例如，某些清洁能源技术可能在当前市场上具有较高的成本，但如果政府提供了相应的补贴或税收优惠，那么这些技术的经济性将得到显著提升。然而，企业不能仅仅追求经济效益而忽视环境效益。作为社会的一员，企业有责任减少碳排放，保护环境。因此，在选择碳中和技术时，企业需要综合考虑技术的环保效益。这包括技术的碳减排效果、对生态系统的影响以及是否符合可持续发展的原则等。为了实现经济效益与环境效益的平衡，企业需要采取综合策略。一方面，企业可以通过技术创新和产业升级来降低碳中和技术的成本，提高其经济性。另一方面，企业也可以积极参与碳交易市场，通过征收碳税或出售碳排放权来获得经济回报，一方面节能减排，另一方面不阻碍经济发展，还

可激励市场技术发新采用更加环保的技术。

3.3 技术创新与产业升级的推动

资源开发中碳中和技术的应用不仅有助于减少碳排放，还将推动技术创新和产业升级。首先，碳中和技术的引入将促使企业采用新技术、新设备和新工艺。这些新技术往往具有更高的能源利用效率和更低的碳排放。通过采用这些新技术，企业可以提高资源利用效率，降低生产成本，从而提升产品质量和市场竞争力。其次，碳中和技术的广泛应用也将带动相关产业链的发展。例如，随着清洁能源技术的普及，风电、光伏等产业的规模将不断扩大，从而带动相关设备制造、材料研发等产业的发展。这些产业的发展将进一步推动技术创新和产业升级，形成新的经济增长点。

结语

资源开发中的碳中和技术路径选择对于实现资源开发与环境保护的协调发展具有重要意义。清洁能源替代、CCUS技术、节能减排技术以及生态修复与碳汇建设是实现这一目标的有效途径，也是实现低碳经济重要的一环。在经济性方面，虽然初期投资较大，但长期来看具有显著的经济效益和社会效益。为推动资源开发中碳中和技术的广泛应用，2023年3月13日，生态环境部《2021、2022年度全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案（发电行业）》发布，加强了市场化的环节。另外，建议政府加大政策支持和资金投入力度，鼓励企业开展技术创新和转型升级。

参考文献

- [1]苏凯,陈毅辉,范水生,等.市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例[J]中国环境科学,2019,39(2):859-867.
- [2]颜建军,邓楠,陈彬,张熙文.“双碳”目标下京津冀地区碳足迹变化及其影响因素研究[J]生态学报,2025,45(3):1-14.
- [3]李哲,王殿常.从水库温室气体研究到水电碳足迹评价:方法及进展[J].2022,53(2):139-153